第 37 卷第 2 期 生 态 学 报 Vol.37,No.2
2017 年 1 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Jan.,2017

DOI: 10.5846/stxb201507271574
邵倩文,刘镇盛,章菁,孙栋,林施泉.长江口及邻近海域浮游动物群落结构及季节变化.生态学报,2017,37(2):683-691.
Shao Q W, Liu Z S, Zhang J, Sun D, Lin S Q.Seasonal variation in zooplankton community structure in the Changjiang Estuary and its adjacent waters.Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):683-691.

长江口及邻近海域浮游动物群落结构及季节变化

邵倩文[1,2],刘镇盛[1,2,*],章　菁[1,2],孙　栋[1,2],林施泉[1,2]
1 国家海洋局第二海洋研究所,杭州　310012
2 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室,杭州　310012

摘要:根据 2006—2007 年长江口及其邻近海域(29°30′N—32°30′N,120°00′E—127°30′E)150 个站位 4 个季节的调查资料,对长江口海域浮游动物群落结构、种类组成、优势种及其季节变化进行研究。结果表明,长江口及其邻近海域浮游动物群落物种多样性丰富,四季共鉴定浮游动物 460 种,隶属 7 个门,246 属,此外,另有 54 类浮游幼体。其中,桡足类是最优势类群,有 193 种,占 41.96%;端足类为第二优势类群,有 51 种,占 11.09%;水螅水母为第三优势类群,有 34 种,占 7.39%。长江口及其邻近海域浮游动物的物种多样性呈现明显季节变化,其特征为:夏季(317 种)>秋季(309 种)>春季(230 种)>冬季(138 种)。中华哲水蚤和百陶带箭虫为长江口及其邻近海域的四季优势种。长江口及其邻近海域浮游动物大体可划分为 5 种生态类群:近岸低盐类群、广温广盐类群、低温高盐类群、高温广盐类群和高温高盐类群。结合同步调查的水文和水化学数据,进行浮游动物群落丰度与环境因子的相关分析表明:盐度是影响长江口及其邻近海域的浮游动物群落丰度的主要环境因子。

关键词:长江口;浮游动物;群落结构;优势种;季节变化

Seasonal variation in zooplankton community structure in the Changjiang Estuary and its adjacent waters

SHAO Qianwen[1,2], LIU Zhensheng[1,2,*], ZHANG Jing[1,2], SUN Dong[1,2], LIN Shiquan[1,2]
1 *Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou* 310012, *China*
2 *Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, State Oceanic Administration, Hangzhou* 310012, *China*

Abstract: Seasonal variation of zooplankton community structure, species composition, and dominant species were determined based on samples collected from 150 stations during four research cruises in the Changjiang Estuary and its adjacent waters (29°30′N—32°30′N, 120°00′E—127°30′E). The study was conducted from July to August 2006 (Summer), December 2006 to February 2007 (Winter), April to May 2007 (Spring), and October to December 2007 (Autumn). The mesoscale study areas were positioned from the Changjiang Estuary to the transition area where freshwater from the Changjiang plume and offshore water masses, such as the Kuroshio and its branches, mix with each other. In total, 460 species of zooplankton belonging to 246 genera and 18 groups from seven phyla, together with 54 types of pelagic larvae, were identified in the Changjiang Estuary and its adjacent waters during four seasons. The 18 groups of zooplankton included Hydromedusae, Siphonophora, Scyphomedusae, Ctenophora, Polychaeta, Cladocera, Copepoda, Ostracoda, Isopoda, Mysida, Cumacea, Amphipoda, Euphausiacea, Decapoda, Chaetognatha, Appendicularia, Thaliacea, and pelagic Mollusca. The most dominant group of zooplankton was Copepoda, including 193 species and accounting for 41.96% of the total species. Amphipoda ranked second, with 51 species accounting for 11.09% of the total species. Hydromedusa

基金项目:国际海域资源调查与开发"十二五"课题(DY125-11-E-03, DY125-14-E-01);中国海洋公益性项目(201005015);中国近海海洋综合调查与评价-水体环境调查与研究(908-ST04-I, 908-ST04-II)

收稿日期:2015-07-27;　　**网络出版日期**:2016-06-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zsliu2012@163.com

was the third dominant group of zooplankton with 34 species and accounted for 7.39% of the total species. There was considerable seasonal and spatial variation in the community structure of zooplankton in the Changjiang Estuary and its adjacent waters. More zooplankton species were found in summer (317 species and 43 types of pelagic larvae) and autumn (309 species and 28 types of pelagic larvae) than in spring (230 species and 27 types of pelagic larvae) and winter (138 species and 21 types of pelagic larvae). The number of species increased gradually from the inshore to offshore waters and from north to south, during all seasons. There were seasonal changes in dominant species in the Changjiang Estuary and its adjacent waters: in spring and winter, *Calanus sinicus* was the most dominant species, but in summer and autumn, the most dominant species was replaced by *Centropages dorsispinatus* and *Subeucalanus subcrassus*, respectively. Only *Calanus sinicus* and *Zonosagitta bedoti* were dominant in all four seasons. Based on species composition and ecological distribution, the zooplankton community in the Changjiang Estuary and its adjacent waters could be divided into five ecological groups, including the coastal brackish water, eurythermal euryhaline, hypothermal hypersaline, hyperthermal euryhaline, and hyperthermal hypersaline group. The dominant species were distributed primarily in the coastal brackish water group and eurythermal euryhaline group. Furthermore, we measured environmental factors and determined the responses of the zooplankton community to the factors, including temperature, salinity, concentration of suspended matter, and concentration of chlorophyll *a*. Results of Pearson's correlation analysis revealed that the most important environmental factor influencing changes in zooplankton community structure in the Changjiang Estuary and its adjacent waters was salinity. Furthermore, the Changjiang diluted water introduced a large number of nutrients, which was beneficial to the growth of plankton, but the estuarine turbidity limited the distribution of zooplankton.

Key Words: Changjiang Estuary; zooplankton; community structure; dominant species; seasonal variation

在典型的温带和亚热带地区,浮游动物是河口和近海生态系统的重要组成部分。浮游动物通过摄食浮游植物而影响初级生产,同时,又被更高营养阶层的动物(鱼、虾、鲸、海鸟等)捕食,其群落结构、种群动态和多样性影响许多鱼类和其他海洋动物资源的生物量,因而浮游动物在海洋食物网中起关键作用[1-2]。同时,河口和冲淡水扩散区常受到陆架水系物理和化学特征的调控,这些复杂因素又影响着浮游动物群落结构及其分布[3]。长江是我国最大的河流,水量丰沛,其平均年入海径流量约 9.28×10^{11} m^3,占输入东海总径流量的 84.4%。长江冲淡水有明显的季节变化,5—10 月份为丰水期,占全年的 71.7%,11—4 月份为枯水期,占全年的 28.3%。在长江河口河水与海水经常交汇、径流与潮流相互抗衡的地带发育成最大浑浊带,最大浑浊带对河口泥沙的聚集和沉降起着十分重要的作用[4]。长江口及邻近海域主要受长江冲淡水、台湾暖流、浙江近岸流和黄海冷水团等水系共同影响,水文环境复杂多变,浮游动物群落在不同水域存在明显差异。

从 1980 年以来,对长江口及其邻近海域浮游动物的研究已有不少报道[5-13],但是中尺度调查研究相对匮乏。首先,研究海域的范围主要集中在 124°E 以西近岸河口区或东海区海域,迄今缺少从长江内河段(120°E)开始延伸至长江冲淡水扩散海域(127°E)中尺度海域的研究报道。其次,针对长江口及其邻近海域浮游动物群落的类群组成及四个季节变化的系统报道甚少。本文采用经典的形态学分类方法,结合同步观测的其他环境因子调查结果,对长江口及其邻近海域(包括长江内河段及长江冲淡水扩散海域)浮游动物群落结构及季节变化等方面进行研究,旨在揭示长江口及其邻近海域浮游动物群落结构时空变化特征,并且探讨浮游动物群落的季节变动与环境因子的关系,为长江口海域资源的可持续利用和海洋生态系统研究提供基础资料和科学依据。

1 材料和方法

1.1 调查区域、采样及分析方法

2006—2007 年,在长江口及其邻近海域 29°30′N—32°30′N,120°00′E—127°30′E(图 1)开展春季

(2007 年4 月—5 月)、夏季(2006 年 7 月—8 月)、秋季(2007 年 10 月—12 月)和冬季(2006 年 12 月—2007 年 2 月)4 个航次的海洋生物生态调查。海上调查由"中国海监 49 船"执行,调查海域共布设 150 个观测站(图 1)。

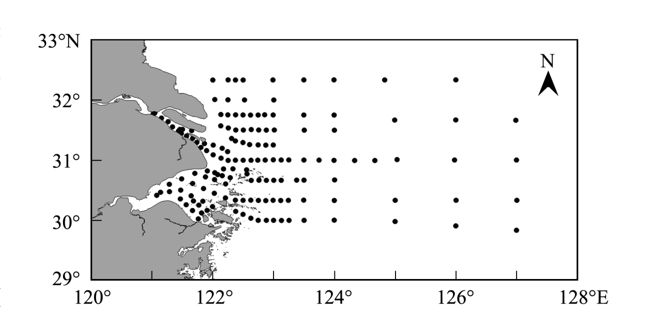


图 1　长江口及其邻近海域采样站位图

Fig.1　Sampling stations in Changjiang Estuary and adjacent areas

浮游动物现场采样中,使用装有进口流量计(德国 HYDRO-BIOS 公司-生物网口流量计 E-Flow)的浅水 I 型浮游生物网(网长 145 cm,网口内径 50 cm,筛绢孔径 0.505 mm,采集水深<30 m 的浮游动物样品)或大型浮游生物网(网长 280 cm,网口内径 80 cm,筛绢孔径 0.505 mm,采集水深>30 m 的浮游动物样品)进行垂直拖网。海域水深<200 m 时,从底层至表层进行垂直拖网,水深>200 m 时,从 200 m 至表层垂直拖网采集样品。将每个测站采集的浮游动物样品装入 600 cm^3 的塑料瓶中,体积分数为加入 5%甲醛溶液固定保存。采集样品带回实验室后,剔除样品中的杂物,利用电子天平(Sartorius CP124S)称量浮游动物生物量,将称量完成后的样品置于体视显微镜下进行浮游动物的种属鉴定和个体计数。海上采样及实验室分析方法均按《海洋生物生态调查技术规程》[14]的规定执行。

同步观测的参数有水温、盐度、悬浮物浓度和叶绿素 a 浓度。海水温度、盐度使用 SYA2-2 进行现场测定。以上参数采样和分析均按《海洋生物生态调查技术规程》[14]、《海洋化学调查技术规程》[15]和《海洋水文气象调查技术规程》[16]的相关规定实施。

1.2　数据处理

本研究采用 Surfer 11.0 绘图软件绘制调查站位图和浮游动物种类数平面分布图,使用 SPSS 20.0 软件对浮游动物丰度和环境因子进行 Pearson 相关分析。本研究的环境因子主要包括表层温度、表层盐度、表层悬浮物浓度、底层温度、底层盐度、底层悬浮物浓度、叶绿素 a 浓度。

浮游动物的优势种根据每个物种的优势度(Y)来确定[17]:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中,n_i为第 i 种的个体数,N 为所有种类总个体数,f_i为出现频率。Y 值大于 0.02 的种类为优势种。

2　结果

2.1　长江口及其邻近海域浮游动物群落结构及季节变化

长江口及其邻近海域四季共出现浮游动物 460 种,隶属 7 个门,15 纲,36 目,133 科,246 属,此外,还有 54 类浮游幼体(表 1)。其中,桡足类是浮游动物最优势的类群,有 193 种,占浮游动物总种类数的 41.96%,端足类为第二优势类群,有 51 种,占 11.09%,水螅水母为第三优势类群,有 34 种,占 7.39%。其它类群包括:十足类 26 种,管水母、多毛类、枝角类各 25 种,毛颚动物 15 种,腹足类 14 种,糠虾类 12 种,涟虫类 9 种,介形类 8 种,栉板动物 5 种,海樽类 6 种,磷虾类和有尾类各 4 种,钵水母 3 种,等足类 1 种。

浮游动物群落种类组成有明显季节变化,夏季(317 种)是浮游动物物种最丰富的季节,秋季(309 种)高于春季(230 种),冬季(138 种)种类数最低。春季,长江口海域共出现浮游动物 17 类,230 种,占全年出现浮游动物种类数的 50.00%,另有浮游幼体 27 类。其中,长江口门区、舟山群岛东南部和东海东北部海域浮游动物种类丰富,形成 3 个高值区(>40 种)(图 2)。夏季,随着水温的上升,浮游动物种类明显增多,共出现浮游动物 17 类,317 种,为长江口海域浮游动物四季种类数的峰值,占全年出现浮游动物种类数的 68.91%,另有浮游幼体 43 类。种类数高值区位于长江口门区、舟山群岛东部和东海东北部陆架海域,大部分水域种类数大于 65 种。种类数低值区位于杭州湾和长江口内河段,浮游动物种类数少于 20 种。夏季从近岸往外海、调查海

域北部往南部,浮游动物种类数分布呈递增趋势(图 2)。秋季,长江口海域共出现浮游动物 18 类,309 种,占全年出现浮游动物种类数的 67.17%,另有浮游幼体 28 类。浮游动物种类数维持在高水平,其中长江口门区和东海东北部陆架海域形成 2 个高值区(>70 种)(图 2)。冬季,长江口海域共出现浮游动物 16 类,138 种,占全年出现浮游动物种类数的 30.00%,另有浮游幼体 21 类。长江口门区海域浮游动物种类相对丰富,形成高值区(>20 种)(图 2)。总体上,长江口及其邻近海域浮游动物种类数外海高于近海,南部高于北部。

表 1 长江口及其邻近海域浮游动物群落组成及季节变化(2006 年 7 月—2007 年 12 月)

Table 1 Seasonal variation and composition of zooplankton community in the Changjiang Estuary and its adjacent waters (Jul. 2006 to Dec. 2007)

门类 Community	类群 Groups	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter		全年 Year	
		种数 Number	/%	种数 Number	/%	种数 Number	/%	种数 Number	/%	种数 Number	/%
刺胞动物 Cnidaria	水螅水母 Hydromedusae	19	8.26	29	9.15	18	5.83	8	5.80	34	7.39
	管水母 Siphonophora	20	8.70	18	5.68	19	6.15	4	2.90	25	5.43
	钵水母 Scyphomedusae	1	0.43	2	0.63	1	0.32	-	-	3	0.65
栉板动物 Ctenophora	栉水母 Ctenophora	3	1.30	5	1.58	2	0.65	1	0.72	5	1.09
环节动物 Annelida	多毛类 Polychaeta	10	4.35	16	5.05	15	4.85	1	0.72	25	5.43
软体动物 Mollusca	腹足纲 Gastropoda	4	1.74	13	4.10	10	3.24	4	2.90	14	3.04
节肢动物 Arthropoda	枝角类 Cladocera	13	5.65	16	5.05	10	3.24	4	2.90	25	5.43
	桡足类 Copepoda	103	44.78	142	44.79	135	43.69	69	50.00	193	41.96
	介形类 Ostracoda	2	0.87	2	0.63	8	2.59	2	1.45	8	1.74
	糠虾类 Mysida	3	1.30	4	1.26	10	3.24	4	2.90	12	2.61
	端足类 Amphipoda	18	7.83	23	7.26	38	12.30	13	9.42	51	11.09
	涟虫类 Cumacea	4	1.74	4	1.26	7	2.27	4	2.90	9	1.96
	等足类 Isopoda	-	-	-	-	1	0.32	-	-	1	0.22
	磷虾类 Euphausiacea	4	1.74	3	0.95	3	0.97	3	2.17	4	0.87
	十足类 Decapoda	11	4.78	19	5.99	15	4.85	8	5.80	26	5.65
毛颚动物 Chaetognatha	箭虫纲 Sagittoidea	7	3.04	12	3.79	11	3.56	8	5.80	15	3.26
尾索动物 Appendicularia	有尾纲 Sagittoidea	3	1.30	3	0.95	3	0.97	4	2.90	4	0.87
	海樽纲 Thaliacea	5	2.17	6	1.89	3	0.97	1	0.72	6	1.30
合计 Total		230		317		309		138		460	
浮游幼体 Pelagic larva		27		43		28		21		54	

2.2 浮游动物群落的生态类群

在河口和近岸水域,环境变量和人类活动因素影响着浮游动物群落的分布和时空变化,陆源径流携带来丰富生源物质,引起近岸水体营养盐浓度的变化,从而改变浮游动物物种多样性和优势种演替[18]。根据浮游动物对温度、盐度和环境的适应性,及其生态习性和分布规律,参考《海洋浮游生物学》等专著和文献[19-23],本文将长江口及其邻近海域浮游动物大体分为 5 种生态类群。

(1)近岸低盐类群

该浮游动物类群种类繁多,主要分布于近岸低盐水域和长江口内河段,是长江口海域主要的生态类群,代表种群有真刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta*、针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 和太平洋纺锤水蚤 *Acartia pacifica* 等。在该类群中,有少数种类属河口低盐性种和淡水种,如:火腿伪镖水蚤 *Pseudodiaptomus poplesia*、虫肢歪水蚤 *Tortanus vermiculus* 等。

(2)广温广盐类群

该类群在长江口海域浮游动物数量上占优势,在长江口水系交汇混合区广泛分布,4 个不同季节均有出现。常见种有中华哲水蚤 *Calanus sinicus*、亚强次真哲水蚤 *Subeucalanus subcrassus* 和百陶带箭虫 *Zonosagitta bedoti* 等。

(3)低温高盐类群

这一类群的浮游动物种类和数量少,出现频率较低,主要出现在中层及深层水域,随着深层水的涌升和黄

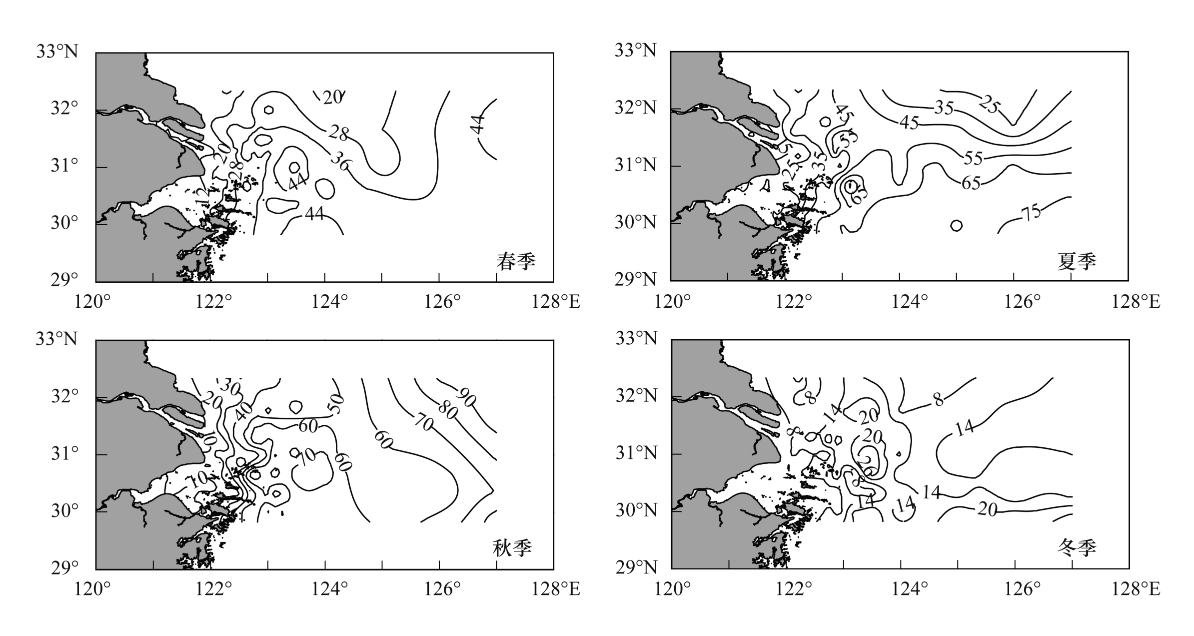


图 2　长江口及其邻近海域浮游动物种类数分布和季节变化

Fig.2　Seasonal variation and distribution of zooplankton species number in Changjiang Estuary and its adjacent waters

海冷水团的作用出现在东海区。代表种有芦氏拟真刺水蚤 *Paraeuchaeta russelli* 和太平洋磷虾 *Euphausia pacifica* 等。

(4)高温广盐类群

这一类群浮游动物数量少,但分布广,常出现在温度较高的夏季和秋季。代表种有孔雀丽哲水蚤 *Calocalanus pavo* 和左突唇角水蚤 *Labidocera sinilobata* 等。

(5)高温高盐类群

这是一类适温、适盐性较高的浮游动物,广泛分布于受台湾暖流和黑潮影响的水域,该类群种类丰富。代表种有精致真刺水蚤 *Euchaeta concinna*、平滑真刺水蚤 *Euchaeta plana* 和肥胖软箭虫 *Flaccisagitta enflata* 等。

2.3　浮游动物优势种的季节变化

长江口及其邻近海域的浮游动物优势种呈现出明显的季节更替现象。中华哲水蚤和百陶带箭虫为长江口及其邻近海域四季优势种(表 2)。春季,优势种有中华哲水蚤、针刺拟哲水蚤、百陶带箭虫。其中,中华哲水蚤平均丰度达(158.6±425.9)个/m^3,优势度为 0.399。夏季,随着水温升高,长江径流量增大,外海暖水种进入研究海域,浮游动物物种多样性上升,优势种集中度明显下降,背针胸刺水蚤成为该海域第一优势种,优势度为 0.105。秋季,浮游动物优势种的集中度下降为四季的最低值,亚强次真哲水蚤成为第一优势种,但其平均丰度仅为(17.7±45.1)个/m^3,其它优势种的平均丰度也不高。冬季,浮游动物优势种的集中度逐渐回升,但丰度明显下降,第一优势种中华哲水蚤的优势度为 0.253,平均丰度仅为(4.8±17.2)个/m^3。

表 2　长江口及其邻近海域浮游动物优势种的季节变化(2006 年 7 月—2007 年 12 月)

Table 2　Seasonal variation of dominant species of zooplankton in the Changjiang Estuary and its adjacent waters (Jul. 2006 to Dec. 2007)

季节 Season	优势种(优势度 *Y*) Dominant species (Dominance *Y*)
春季 Spring	中华哲水蚤(0.399)、针刺拟哲水蚤(0.028)、百陶带箭虫(0.026)
夏季 Summer	背针胸刺水蚤(0.105)、太平洋纺锤水蚤(0.077)、中华哲水蚤(0.058)、百陶带箭虫(0.040)、针刺拟哲水蚤(0.037)、精致真刺水蚤(0.033)、平滑真刺水蚤(0.024)、肥胖软箭虫(0.024)、真刺唇角水蚤(0.022)
秋季 Autumn	亚强次真哲水蚤(0.079)、百陶带箭虫(0.068)、平滑真刺水蚤(0.055)、芦氏拟真刺水蚤(0.037)、中华哲水蚤(0.032)、肥胖软箭虫(0.024)
冬季 Winter	中华哲水蚤(0.253)、真刺唇角水蚤(0.047)、百陶带箭虫(0.041)、捷氏歪水蚤(0.038)、精致真刺水蚤(0.028)

2.4 长江口及其邻近海域环境因子的季节变化

长江口及其邻近海域环境因子有明显季节变化(表3)。水温的季节变化特征为:夏季>秋季>春季>冬季,夏季底层水温明显低于表层水温,其它季节表层水温和底层水温相近;表层盐度季节变化特征为:冬季>春季>秋季>夏季,底层盐度季节变化特征为:春季>冬季>夏季>秋季,其中,春季和夏季表层平均盐度明显高于底层平均盐度;表层悬浮物浓度的季节变化为:冬季>春季>秋季>夏季,底层悬浮物浓度的季节变化为:秋季>春季>冬季>夏季,夏季悬浮物平均浓度四季最低,春季和秋季底层悬浮物平均浓度明显高于表层,冬季表层和底层悬浮物平均浓度差别不大;叶绿素 a 浓度的季节变化为:夏季>春季>秋季>冬季。

表3 长江口及其邻近海域物理、化学和生物特征季节变化(2006年7月—2007年12月)

Table 3 Seasonal variation of physical, chemical and biological characteristics in the Changjiang Estuary and its adjacent waters (Jul. 2006 to Dec. 2007)

环境因子 Environmental factors	春季 Spring	夏季 Sumer	秋季 Autumn	冬季 Winter
表层水温 surface temperature/°C	15.42±1.66	27.75±1.63	21.01±1.69	11.79±3.47
底层水温 bottom temperature/°C	15.28±1.77	23.52±3.99	21.07±1.58	11.93±3.47
表层盐度 surface salinity	24.70±10.88	21.07±11.57	23.26±11.61	25.36±10.88
底层盐度 bottom salinity	26.17±10.66	24.94±12.32	24.12±11.89	25.71±10.68
表层悬浮物浓度 Concentration of surface suspended matter/(mg/L)	370.63±1084.71	118.83±237.01	273.93±654.32	449.52±1035.61
底层悬浮物浓度 Concentration of bottom suspended matter/(mg/L)	545.83±1348.64	177.54±383.54	666.90±1368.52	495.75±1037.08
叶绿素 a 浓度 Concentration of chlorophyll a/(mg/m^3)	2.04±2.23	4.82±8.70	1.55±3.04	0.97±0.98

2.5 浮游动物丰度与环境因子关系

浮游动物丰度与环境因子间的 Pearson 相关性系数见表4。春季,浮游动物丰度与温度和盐度呈现极显著正相关(P<0.01),与悬浮物浓度呈现显著负相关(P<0.05);夏季,浮游动物丰度与悬浮物浓度呈现极显著正相关(P<0.01),与表层温度呈现极显著负相关(P<0.05),与底层盐度和叶绿素 a 浓度呈现显著正相关(P<0.05);秋季,浮游动物丰度与盐度和叶绿素 a 浓度呈现极显著正相关(P<0.01),与悬浮物浓度呈现极显著负相关(P<0.01);冬季,浮游动物丰度与盐度呈现极显著负相关(P<0.01)。

表4 长江口及其邻近海域浮游动物丰度与环境因子的相关性(2006年7月—2007年12月)

Table 4 Relationships between zooplankton abundance and environmental variables in the Changjiang Estuary and its adjacent waters (Jul. 2006 to Dec. 2007)

春 Spring		夏 Summer		秋 Autumn		冬 Winter	
环境	相关系数	环境	相关系数	环境	相关系数	环境	相关系数
ST	0.225**	ST	−0.283**	ST	−0.052	ST	−0.113
BT	0.253**	BT	−0.084	BT	−0.043	BT	−0.127
SS	0.218**	SS	0.134	SS	0.608**	SS	−0.234**
BS	0.236**	BS	0.182*	BS	0.587**	BS	−0.234**
SSM	−0.176*	SSM	0.323**	SSM	−0.257**	SSM	−0.074
BSM	−0.185*	BSM	0.316**	BSM	−0.217**	BSM	−0.093
Chl a	0.015	Chl a	0.165*	Chl a	0.270**	Chl a	−0.035

ST:表层温度 surface temperature;BT:底层温度 bottom temperature;SS:表层盐度 surface salinity;BS:底层盐度 bottom salinity;SSM:表层悬浮物浓度 concentration of surface suspended matter;BSM:底层悬浮浓度物 concentration of bottom suspended matter;Chl a:叶绿素 a 浓度 concentration of chlorophyll a; ** P <0.01; * P <0.05

3　讨论

3.1　浮游动物群落结构及其优势种

本研究共鉴定出浮游动物 460 种,浮游幼体 54 类。其中,桡足类有 193 种,占总种类数的 41.96%,其次是端足类和水螅水母,分别占总种类数的 11.09%和 7.39%。桡足类是该研究区域的主要生态类群,这一结果和历史资料报道的结果[5-13]一致。本研究海域范围覆盖从长江内河段至长江冲淡水扩散区外海陆架 127°E 海域,而从 1980s 以来,长江口及其邻近海域浮游动物的研究海域的范围主要集中在 124°E 以西近岸水域,调查海域面积相对较小,且大部分的研究都仅局限于单个或两个季节的浮游动物群落结构研究,未涉及群落季节变化。因此,本文有关长江口及其邻近海域浮游动物群落结构组成种类数明显高于已报道的文献数据(表 5)[5-13]。王金辉[9]等人对 2004 年 2 月—11 月长江口海域浮游动物群落季节变化进行研究,显示种类数呈现秋季(91 种)>夏季(77 种)>冬季(73 种)>春季(24 种)。本研究的结果与其报道的结果存在差异,呈现夏季(317 种)>秋季(309 种)>春季(230 种>冬季(138 种)。图 2 表明近岸区域浮游动物群落的物种多样性要明显低于远海区域,同时长江冲淡水的影响范围往往延伸至 123°E 以东的区域,而上述研究的调查水域仅局限于 123°E 以西近岸水域,因此其浮游动物调查的结果尚不能全面反映长江冲淡水扩散海域浮游动物群落结构特征。

表 5　长江口及其邻近海域浮游动物种丰富度比较

Table 5　Comparison of zooplankton species richness in Changjiang Estuary and its adjacent waters

经纬度 Longitude and latitude	调查时间 Time	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	参考文献 References
31°00′N—31°32′N 121°21′25″E—122°30′E	1999—2000 年	—	87	—	—	[5]
30°40′00″N—31°36′36″N 121°23′E—123°40′E	2002 年	—	74	—	—	[6]
—	2000—2003 年	82	125	—	—	[7]
—	2003	—	258	—	—	[8]
30°30′N—31°45′N, 123°00′E 以西	2004	24	77	91	73	[9]
29°30′N—32°00′N 123°E 以西	2005	—	104	95	—	[10]
—	2006	—	295	—	—	[11]
29.90°N—31.61°N 121.04°E—122.77°E	2009	72	—	—	—	[12]
30.5°N—32.0°N 122.0°E—123.5°E	2011	97	—	—	—	[13]
29°30′N—32°30′N 120°00′E—127°30′E	2006—2007 年	230	317	309	138	本研究

本研究优势种的组成中桡足类为最优势类群,箭虫也是重要类群之一。浮游动物生态类群以广温广盐和近岸低盐种类为主,夏、秋季常出现平滑真刺水蚤和肥胖软箭虫等高温高盐暖水种和热带外海种,这与长江口及邻近海域东南部和南部常年受黑潮水和台湾暖流等高温高盐水不同程度的影响相符。桡足类的中华哲水蚤在春季和冬季为第一优势种,优势度非常高,分别为 0.253 和 0.399,这和以往冬季和春季的调查结果[7,9]一致。在夏、秋季,中华哲水蚤的优势度有所下降,第一优势种的位置分别被背针胸刺水蚤和亚强次真哲水蚤代替,这与刘光兴[8]等和朱延忠[12]等人报道的夏、秋季第一优势种是中华哲水蚤有所差异,但中华哲水蚤仍为本研究夏、秋季浮游动物优势种之一,这主要因本研究调查海域尺度远大于上述研究区域,而长江口及冲淡水

海域区域性环境特征差异对统计分析结果产生影响。长江三峡工程已于 1997 年 11 月实现了大江截流,2009 年工程竣工。随着三峡工程建设,对长江口生态与环境的研究已有报道[8,11,24],刘光兴[8]等和陈洪举[11]等人比较了长江三峡工程一期蓄水前后的浮游动物群落结构,发现浮游动物种类数量没有下降反而增多,浮游动物群落结构也没有出现显著变化的结论。本研究比较了三峡工程二期蓄水前历史资料中所记录的浮游动物种类数,表明研究海域的浮游动物物种多样性仍比较高,其种类数并未下降,而是出现了增多的趋势,并且,浮游动物的群落结构也没有出现显著的变化。浮游动物群落结构和多样性的变化反映海洋生态系统的波动,因此,长江口及其邻近海域生态系统变化依然需要长期跟踪调查。

3.2 环境因子对浮游动物群落的影响

长江口及其邻近海域在长江冲淡水、台湾暖流和江浙近岸流等多个水系的共同作用影响下,形成独特海洋理化环境,浮游动物的群落分布与水温、盐度、营养盐等都密切相关[25]。环境因子与浮游动物丰度的相关分析(表 4)表明,盐度是影响浮游动物群落丰度分布的主要环境因子,本结果与徐兆礼[7]、刘光兴[8]等、陈洪举[11]等对长江口及其附近海区的研究结果一致。本研究的调查范围主要包括长江河口段至长江冲淡水扩散的海域,受长江径流和外海水等共同影响,长江口及邻近海域水环境的空间差异明显,从长江口到外海存在明显的盐度梯度,盐度的变化影响了浮游动物群落结构,其影响主要有两个方面:1) 在长江冲淡水主干影响的区域内,盐度相对较低,该海域的浮游动物群落组成以河口种和低盐种为主;2) 在陆架外海高盐区和 123°E 以东受黑潮及其分支台湾暖流影响的区域,外海水团携带了大量的高温高盐种(如:肥胖软箭虫等),对群落组成起主导作用。春季、夏季和秋季,研究海域的黑潮势力强,外海的高温高盐种逐渐地向近岸扩展,而在冬季,受到北方冷空气和寒流的频繁影响,大量高温高盐种消失,浮游动物仅在长江口附近形成小范围的低盐种密集区。在其它河口水域的研究报道中,Li[26]等人对珠江口海域及 Mouny[27]等人对英吉利海峡塞纳河口的研究也表明,盐度是影响河口水域浮游动物群落的重要因子。

长江口属于特大型淤泥底质三角洲地带,长江径流每年携带大量泥沙进入长江口水域,在水动力作用下发生沉降、运输和再悬浮等过程。在长江咸淡水交汇区,由于径流和潮流相互作用,出现长江口浑浊带,悬沙浓度较高[28]。本研究表明,在悬浮物平均浓度最低且叶绿素 a 的平均浓度最高的夏季,浮游动物丰度与悬浮物浓度和叶绿素 a 浓度呈正相关。而在悬浮物平均浓度较高、叶绿素 a 的平均浓度较低的秋季,浮游动物丰度均与悬浮物浓度呈现负相关,而与叶绿素 a 浓度呈正相关。长江冲淡水携带了大量营养盐,有助于浮游植物的生长代谢,但是当海水中悬沙浓度过高时,水体透明度降低,浮游植物的有效辐射光强减弱,浮游植物现存量减少,这将抑制浮游动物生长繁殖的营养需求,本研究与何文珊[29]等和杜萍[30]等人的研究结果一致。Deniz Özkundakci[31]等人的研究表明悬沙还会影响滤食性浮游动物的摄食。

温度也是影响浮游动物丰度的重要因子,尤其在春季和夏季(表 4)。春季,研究海域水温升高有助于浮游动物的生长和繁殖。丁峰元[32]等人对我国东海的调查和朱延忠[12]等人对长江口的调查结果均表明温度是影响浮游动物春季分布的主要因子。夏季,海水表层温度普遍升高,高温对浮游动物的生长代谢不利,而底层水温相对较低,部分浮游动物存在度夏机制,比如中华哲水蚤夏季有两个月的时间生活在底层冷水团中,且生物学特征具有明显的休眠特征[33],这可能是中华哲水蚤未能成为本研究夏季第一优势种的主要原因之一。

致谢:国家海洋局第二海洋研究所陈建芳研究员提供长江口海域水悬浮物数据,黄大吉研究员提供温、盐数据,郝强副研究员提供叶绿素 a 数据,“海监 49 号”科学考察船全体船员在海上采样过程中给予帮助,香港科技大学刘红斌教授对写作给予帮助,特此致谢。

参考文献(References):

[1] Mousseau L, Lefevre D, Narcy F, Nival P, Andersen V. A one-month study of the zooplankton community at a fixed station in the Ligurian Sea: the potential impact of the species composition on the mineralization of organic matter. Biogeosciences Discussions, 2009, 6(1): 995-1019.

[2] Madin L P, Horgan E F, Steinberg D K. Zooplankton at the Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS) station: diel, seasonal and interannual

variation in biomass, 1994-1998. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2001, 48(8/9): 2063-2082.

[3] Morgan C A, de Robertis A, Zabel R W. Columbia River plume fronts. I. Hydrography, zooplankton distribution, and community composition. Marine Ecology Progress Series, 2005, 299: 19-31.

[4] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 2001.

[5] 郭沛涌, 沈焕庭, 刘阿成, 王金辉, 杨元利. 长江河口浮游动物的种类组成、群落结构及多样性. 生态学报, 2003, 23(5): 892-900.

[6] 纪焕红, 叶属峰. 长江口浮游动物生态分布特征及其与环境的关系. 海洋科学, 2006, 30(6): 23-30.

[7] 徐兆礼. 长江口邻近水域浮游动物群落特征及变动趋势. 生态学杂志, 2005, 24(7): 780-784.

[8] 刘光兴, 陈洪举, 朱延忠, 齐衍萍. 三峡工程一期蓄水后长江口及其邻近水域浮游动物的群落结构. 中国海洋大学学报, 2007, 37(5): 789-794.

[9] 王金辉, 徐韧, 秦玉涛, 孙亚伟, 刘材材. 长江口基础生物资源现状及年际变化趋势分析. 中国海洋大学学报, 2006, 36(5): 821-828.

[10] 章飞燕, 唐静亮, 李道季, 方涛, 王彪. 夏、秋季长江口及毗邻海域浮游动物的分布与变化. 水生生物学报, 2009, 33(6): 1219-1225.

[11] 陈洪举, 刘光兴. 2006 年夏季长江口及其邻近水域浮游动物的群落结构. 北京师范大学学: 自然科学版, 2009, 45(4): 393-398.

[12] 朱延忠, 刘录三, 郑丙辉, 王瑜. 春季长江口及毗邻海域浮游动物空间分布及与环境因子的关系. 海洋科学, 2011, 35(1): 59-65.

[13] 汤新武, 蔡德所, 陈求稳, 王丽, 韩瑞. 三峡工程三期蓄水初期长江口水域春季浮游动物群落特征及其与环境的关系. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1082-1088.

[14] 国家海洋局“908”专项办公室. 海洋生物生态调查技术规程. 北京: 海洋出版社, 2006.

[15] 国家海洋局“908”专项办公室. 海洋化学调查技术规程. 北京: 海洋出版社, 2006.

[16] 国家海洋局“908”专项办公室. 海洋水文气象调查技术规程. 北京: 海洋出版社, 2006.

[17] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲹渔场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13-15, 19-19.

[18] Park G S, Marshall H G. Estuarine relationships between zooplankton community structure and trophic gradients. Journal of Plankton Research, 2000, 22(1): 121-136.

[19] 郑重, 李少菁, 许振祖. 海洋浮游生物学. 北京: 海洋出版社, 1984.

[20] 唐启升. 中国专属经济区海洋生物资源与栖息环境. 北京: 科学出版社, 2006.

[21] 郑执中. 黄海和东海西部浮游动物羣落的结构及其季节变化. 海洋与湖沼, 1965, 7(3): 199-204.

[22] 陈亚瞿, 朱启琴, 陈清潮. 东海浮游动物量的分布特征. 海洋学报, 1980, 2(4): 115-121.

[23] 何德华, 杨关铭, 沈伟林, 刘红斌. 浙江沿岸上升流区浮游动物生态研究——II.浮游动物种类分布与多样度. 海洋学报, 1987, 9(5): 617-626.

[24] 线薇薇, 刘瑞玉, 罗秉征. 三峡水库蓄水前长江口生态与环境. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 119-123.

[25] 曹勇, 陈吉余, 张二凤, 陈沈良, 曹卫承. 三峡水库初期蓄水对长江口淡水资源的影响. 水科学进展, 2006, 17(4): 554-558.

[26] Li K Z, Yin J Q, Huang L M, Tan Y H. Spatial and temporal variations of mesozooplankton in the Pearl River Estuary, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 67(4): 543-552.

[27] Mouny P, Dauvin J C. Environmental control of mesozooplankton community structure in the Seine Estuary (English Channel). Oceanologica Acta, 2002, 25(1): 13-22.

[28] 周华君. 长江口最大浑浊带特性研究. 重庆交通学院学报, 1994, 13(2): 8-15.

[29] 何文珊, 陆健健. 高浓度悬沙对长江河口水域初级生产力的影响. 中国生态农业学报, 2001, 9(4): 24-27.

[30] 杜萍, 徐晓群, 刘晶晶, 曾江宁, 陈全震, 寿鹿, 廖一波, 周青松. 椒江口春、秋季浮游动物分布特征及与主要环境因子的关系. 应用与环境生物学报, 2011, 17(4): 486-494.

[31] Özkundakci D, Duggan I C, Hamilton D P. Does sediment capping have post-application effects on zooplankton and phytoplankton? Hydrobiologia, 2011, 661(1): 55-64.

[32] 丁峰元, 李圣法, 董婧, 程家骅. 春季东海区近海浮游动物群落结构及其影响因子. 海洋渔业, 2005, 27(1): 26-32.

[33] 唐启升, 苏纪兰, 孙松, 张经, 黄大吉, 金显仕, 仝龄. 中国近海生态系统动力学研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(12): 1288-1299.